

卫星角反射器精度对远场衍射模式的影响

周 辉 李 松* 郑国兴 高俊玲

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要 卫星角反射器作为激光测距系统中的合作目标,其主要作用在于提高地面接收机范围内反射光束的能量密度。经卫星角反射器返回的光束能量分布与角反射器加工参数有很大关联。基于角反射器的几何结构模型,采用矢量形式的折反射定律,建立了在不同光束入射条件下,具有二面角和面形误差的角反射器的出射光场的相位分布和远场衍射模式的数学模型。针对圆形切割的角反射器,仿真计算了不同光束入射角及方位角、角反射器二面角和面形误差所对应的远场衍射模式,并详细分析了它们对远场衍射模式的影响规律。仿真结果表明,随着二面角误差、面形误差和光束入射角的增加,远场衍射强度的发散程度增加。根据远场衍射模式和速差补偿理论,提出了一种在较大观测范围内二面角速差补偿方法。

关键词 衍射光学; 卫星角反射器; 远场衍射模式; 速差补偿

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0060

Influence of Satellite Retroreflector Precision on Far-Field Diffraction Pattern

Zhou Hui Li Song Zheng Guoxing Gao Junling

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract Satellite retroreflector is used as laser ranging cooperative target to improve the intensity of reflected beam, which has close relationship with processing parameters of the retroreflector. Based on geometrical structure of retroreflector and vector form of reflection-refraction law, mathematical models with phase distribution of returned beam, and far-field diffraction pattern (FFDP) are built up for retroreflector with dihedral angle error and flatness error. As for retroreflector with circular section, FFDP under different incident conditions of laser beam, dihedral angle error and flatness error is simulated. Meantime, the rules of their effect on FFDP are analysed at length. Simulated results express that the divergence of FFDP is increased with dihedral angle error, flatness error and laser incident angle. In terms of FFDP and velocity aberration compensation theory, a new method of using dihedral angle offset for compensating velocity aberration in large observation range is put forward.

Key words diffraction optics; retroreflector; far-field diffraction pattern (FFDP); velocity aberration

1 引 言

角反射器是一种具有定向反射特性的光学元件,广泛应用于各种激光测量系统^[1,2]。随着在轨卫星定轨精度要求的不断提高,已经有越来越多的卫星上开始安置角反射器,卫星角反射器的设计和加工要求也越来越高。对于反射面没有镀高反金属膜的角反射器,在分析返回光束的远场衍射模式时,偏振特性是其必须考虑的因素^[3~5]。偏振特性会导

致角反射器远场衍射强度分布更为弥散,从而使强度降低^[6]。为提高接收机处的强度,在低轨卫星上使用的角反射器普遍在反射面镀制高反银膜,以消除偏振特性的影响。

目前,在不考虑偏振特性的情况下,国内外的报道仅讨论了光束垂直入射或只考虑二面角误差时角反射器的远场衍射模式^[7,8]。显然,这对于分析角反射器远场衍射模式的真实状态是远远不够的。本

收稿日期: 2008-04-14; 收到修改稿日期: 2008-05-16

基金项目: 航天工程项目资助课题。

作者简介: 周 辉(1979—),男,博士后,主要从事激光遥感及激光测距技术等方面的研究。E-mail: abidingmyself@163.com

* 通信联系人。E-mail: yflisong@public.wh.hb.cn

文全面详实地分析了角反射器远场衍射模式的数学模型,首次建立了不同光束入射条件下,远场衍射模式与角反射器二面角和面形误差关系的理论表达式,并仿真分析了远场衍射模式的分布规律。同时,将远场衍射模式理论用于角反射器速差补偿,研究结果对于卫星角反射器的设计具有重要的指导意义。

2 出射光场的相位分布

角反射器在加工过程中存在着二面角误差和面形误差,这些误差会导致出射光场的相位分布发生改变。

2.1 存在二面角误差时出射光场的相位分布

建立如图 1 所示的直角坐标系:以角反射器的顶点为原点,分别以角反射器的三条直角棱为 x 轴、 y 轴和 z 轴,称 $o-xyz$ 坐标系为角反射器棱坐标系;以角反射器顶点在底面的投影 o' 为原点,以底面的法线方向为 z' 轴方向,以 y 轴在底面的投影为 y' 轴, x' 轴方向由右手螺旋法则确定。则 $o-xyz$ 坐标系与 $o'-x'y'z'$ 坐标系之间存在转换关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a/3 \\ a/3 \\ a/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{3}/3 \\ 0 & \sqrt{6}/3 & \sqrt{3}/3 \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a/3 \\ a/3 \\ a/3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{M} 为转换矩阵, a 为角反射器的棱长。若角反射器底面采用圆形切割,则 $a = \sqrt{6}r$, r 为角反射器底面圆半径。

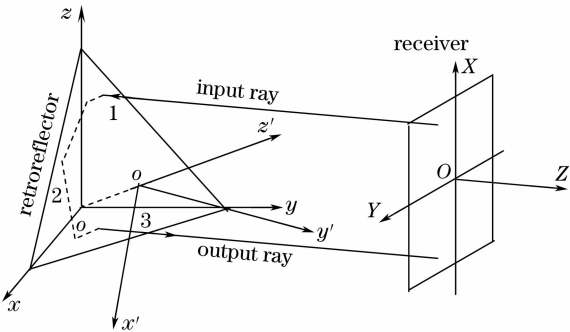


图 1 角反射器结构及坐标系

Fig. 1 Structure and coordinate systems for retroreflector

角反射器具有二面角误差时三个反射面将不再相互垂直,彼此法线之间存在的微小夹角 δ_{12} 、 δ_{23} 和 δ_{31} 即为角反射器的二面角误差。折射光线矢量 \mathbf{A} 经过三个反射面反射后,其光线矢量将不再与 \mathbf{A} 矢

量平行,两者之间会有一个偏角。对于 6 种不同反射次序而言,其最终的反射光矢量可以表示成^[5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{123} &= \begin{bmatrix} 1 & 2\delta_{12} & 2\delta_{13} \\ -2\delta_{12} & 1 & 2\delta_{23} \\ -2\delta_{13} & -2\delta_{23} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_{231} &= \begin{bmatrix} 1 & -2\delta_{12} & -2\delta_{13} \\ 2\delta_{12} & 1 & 2\delta_{23} \\ 2\delta_{13} & -2\delta_{23} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_{312} &= \begin{bmatrix} 1 & 2\delta_{12} & -2\delta_{13} \\ -2\delta_{12} & 1 & -2\delta_{23} \\ 2\delta_{13} & 2\delta_{23} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_{321} &= -\mathbf{F}_{123} + 2\mathbf{A}, \\ \mathbf{F}_{132} &= -\mathbf{F}_{231} + 2\mathbf{A}, \\ \mathbf{F}_{213} &= -\mathbf{F}_{312} + 2\mathbf{A}, \end{aligned} \quad (2)$$

将该矢量形式转换到 $o'-x'y'z'$ 坐标系下,则可以表示为:

$$\mathbf{F}'_{ijk} = \mathbf{M}\mathbf{F}_{ijk}, \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

最终的反射光矢量入射到角反射器底面,经过最后一次折射后从角反射器底面出射,其出射光矢量可由矢量形式的折射定律得到

$$\mathbf{C}'_{ijk} = [C'_{ijk-1} \quad C'_{ijk-2} \quad C'_{ijk-3}]^T = n\mathbf{F}'_{ijk} + \tau'\mathbf{N}'_o, \quad (3)$$

$$i, j, k = 1, 2, 3$$

式中

$$\mathbf{N}'_o = [0 \quad 0 \quad 1]^T,$$

$$\tau' = \sqrt{1 - n^2 + (n\mathbf{F}'_{ijk} \cdot \mathbf{N}'_o)^2} \mathbf{N}'_o - n\mathbf{F}'_{ijk} \cdot \mathbf{N}'_o.$$

因此,可推导出在 $o'-x'y'z'$ 坐标系下出射光的相位形式为

$$\phi_d = k(C'_{ijk-1}x' + C'_{ijk-2}y' + C'_{ijk-3}z'), \quad (4)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为入射光的波数, λ 为入射光波长。出射光在角反射器底面($z' = 0$)的相位可以表示为 $\phi_d = k(C'_{ijk-1}x' + C'_{ijk-2}y')$ 。

2.2 存在面形误差时出射光场的相位分布

角反射器制造过程中除了存在二面角误差外,也存在面形误差。面形误差导致出射光产生额外的附加相位,该相位与角反射器反射面的面形及光束入射条件有关。

存在面形误差的反射面可视为曲率半径很大的球面,由于角反射器反射面的线度要远小于该曲率半径,因此忽略角反射器面形误差对反射光线方向和反射点偏移量的影响。对于单个反射面而言,图 2 给出了考虑面形误差时反射光线的示意图。

图 2 中 α 为光束入射角, L_1S_1 和 L_2S_2 分别为考虑反射面面形误差前后的反射光线。其中 L_1S_1 和

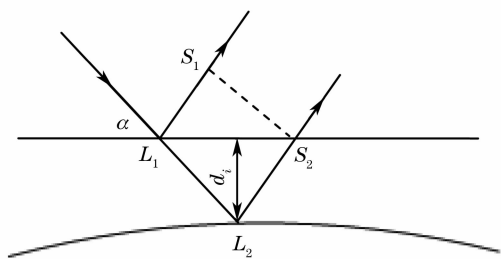


图2 角反射器反射面弯曲附加的相位值

Fig. 2 Additional phase added to the reflection at a curved reflection surface of retroreflector

L_2S_2 相互平行, 并且 L_1 和 S_2 近似重合。由于反射面面形误差的存在, 反射光线有了一个相对的附加相位值, 可以表示为

$$\Delta\Phi_i = 2knd_i \cos \alpha, \quad (5)$$

式中 d_i 为球面与理想平面的偏差。对于反射面 1, 2, 3 而言, d_i 表达式为

$$\begin{cases} d_1 = -[(y-u)^2 + (z-u)^2]/(2R_1), \\ d_2 = -[(x-u)^2 + (z-u)^2]/(2R_2), \\ d_3 = -[(x-u)^2 + (y-u)^2]/(2R_3), \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式中, $u = a/4$, $R_i = 2u^2/(T_i\lambda)$ ($i = 1, 2, 3$) 为反射面的曲率半径, T_i 为角反射器反射面的光圈数。因此, 光线经过三次反射面的反射后, 由面形误差引

入的附加相位值为:

$$\Delta\Phi = \sum_{i=1}^3 \Delta\Phi_i. \quad (7)$$

在综合考虑角反射器二面角和面形误差的情况下, 出射光场的相位分布可表示为:

$$\Phi = \phi_d + \Delta\Phi. \quad (8)$$

由于角反射器的定向反射特性, 出射光场的相位分布近似与入射光场的相位分布相同, 两者的差异仅表现在二面角误差及面形误差对相位的贡献。

波像差可以由 $\Delta\Phi$ 的最大值和最小值之差求出, 假设三个反射面都具有相同的面形误差 t 时, 波像差的表达式为^[9]

$$W = \frac{8}{3\sqrt{3}}n\lambda T. \quad (9)$$

根据瑞利判据, 当波像差小于 0.25 个波长时, 角反射器面形误差对相位的贡献可以忽略。因此, 对于熔石英材料的角反射器而言, 面形误差 $T \leq 0.1$ 个光圈。

采用以上的数学模型, 当光束垂直入射到角反射器底面时, 由二面角和面形误差对出射光场的相位贡献(等高线分布)如图 3 所示。图 3 中所标注的数字表示附加的波差值, 单位为波长。

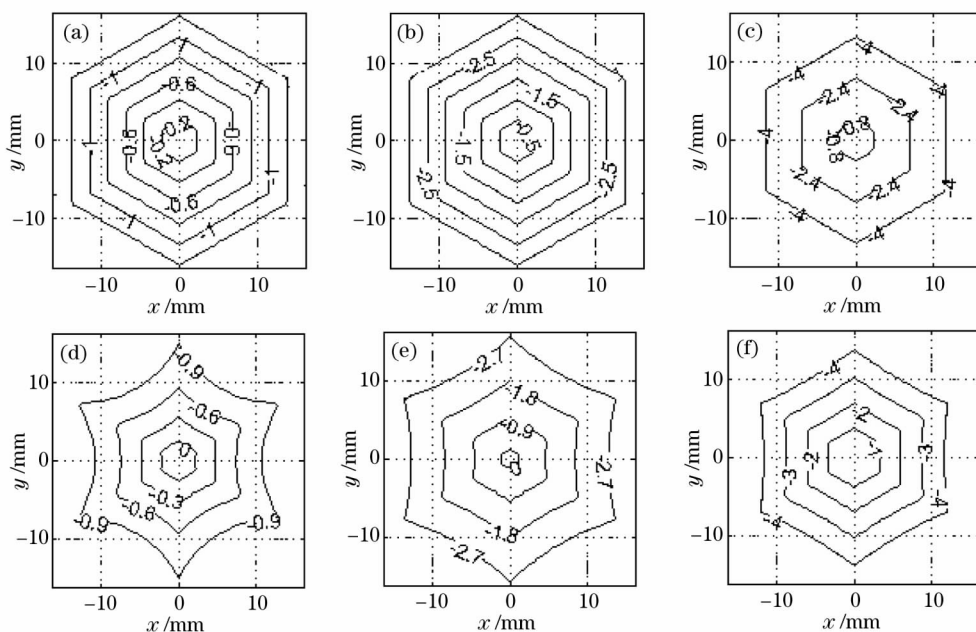


图3 有二面角和面形误差的角反射器的相位分布

Fig. 3 Phase distribution of retroreflector with dihedral angle error and flatness error

图 3 显示, 当角反射器仅存在三个相同的二面角误差时, 出射光场的波面额外附加了六个对称的平面波因子。随着二面角误差的逐渐增大, 附加的平面波相位也越大。角反射器面形误差的引入则使

得出射光场的波面发生了进一步的弯曲, 其弯曲程度与面形误差的大小有关。角反射器面形误差越大, 则波面的弯曲程度越厉害。

事实上, 由面形误差和二面角误差引入的附加

相位还与光束入射角有关。随着光束入射角的增加,二面角和面形误差对出射光场的相位贡献(等高线分布)发生了改变。取角反射器面形误差为 0.1 个光圈,在不同的二面角误差情况下,光束入射条件对相位分布的作用如图 4 所示。

图 4 显示,光束倾斜入射因子不仅改变了出射

光场的相位分布,而且改变了出射光场的有效衍射区域。在相同的入射条件下,二面角误差的增加对出射光场的相位分布规律不产生影响,而仅仅相应地增加出射光场的相位值。由于星上角反射器需要在一个较大的角度区间内均保证入射光的有效反射,因此设计中必须考虑光束的倾斜入射情况。

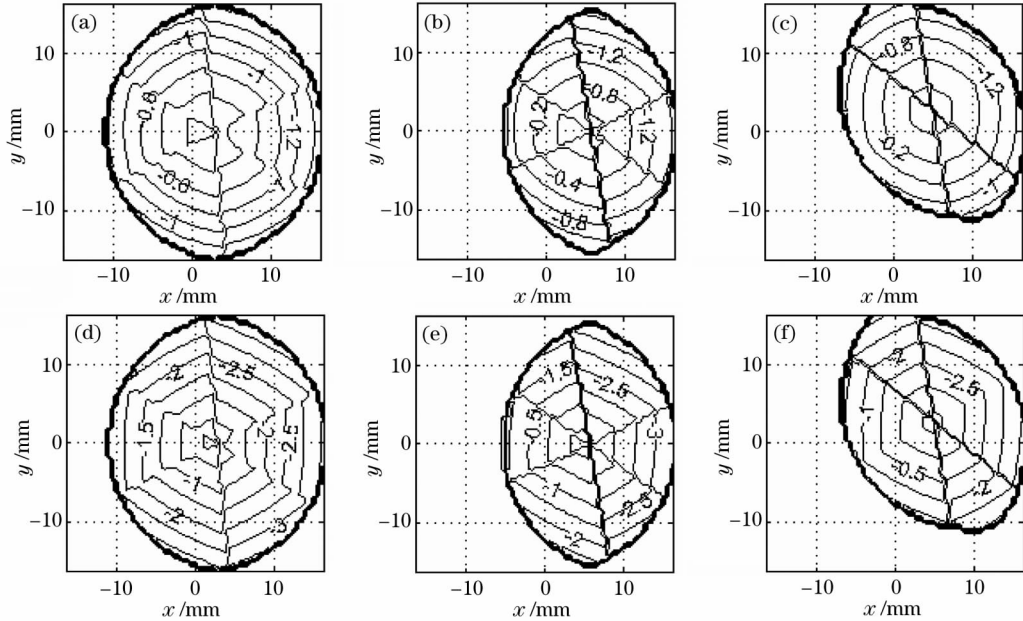


图 4 不同入射条件下角反射器的相位分布

Fig. 4 Phase distribution of retroreflector with different incidence condition

3 角反射器的远场衍射公式的近似

3.1 接收屏坐标系与底面坐标系的关系

考虑到角反射器的定向反射特性,衍射光场的接收方向应该与入射光方向平行。因此,图 1 中建立了远场衍射接收屏坐标系 $O-XYZ$ 。其中,原点 O 与底面中心 o' 在入射光方向上的距离为观测距离 H , Z 轴方向与理想的出射光方向重合, Y 轴为 y' 轴在接收屏内的投影, X 轴方向由右手螺旋法则确定。由 $O-XYZ$ 坐标系与 $o'-x'y'z'$ 坐标系之间的相互位置关系,可以确定两个坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_3}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} & \frac{-R_1 R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} & R_1 \\ 0 & \sqrt{R_1^2 + R_3^2} & R_2 \\ \frac{-R_1}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} & \frac{-R_2 R_3}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + H \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

若入射光在 $o'-x'y'z'$ 坐标系下的入射角为 φ , 方位

角为 θ , 则入射光矢量方向为

$$\mathbf{R} = [-R_1 \quad -R_2 \quad -R_3]^T = [-\sin \varphi \cos \theta \quad -\sin \varphi \sin \theta \quad -\cos \varphi]^T. \quad (11)$$

3.2 远场衍射场公式的近似

由于激光经过远距离的传输,其入射到角反射器表面的光斑远大于角反射器的口径,因此,入射到角反射器底面的光波可看作平面波,假设其振幅为 1。

考虑到入射光倾斜入射至角反射器底面,则衍射光场中引入了倾斜因子,其计算公式可通过基尔霍夫衍射公式得到^[10]

$$E(X, Y) = \frac{\cos \varphi}{i\lambda H} \iint_{\Sigma} \exp(i\phi) \exp(ik\rho) dx' dy', \quad (12)$$

式中 Σ 因子为角反射器的有效衍射区域,它与角反射器口径和光束入射条件有关。 ϕ 因子为角反射器出射光波的相位分布,

$$\rho = \sqrt{(X' - x')^2 + (Y' - y')^2 + Z'^2},$$

且向量 $[X', Y', Z']$ 与接收屏上的平面坐标 $(X, Y, 0)$ 之间的转换关系如(10)式所示。由于 ρ 因子较为复

杂,影响衍射场计算的速度,因此,由公式(10)并考虑到 H 因子远大于角反射器口径及衍射场的观察

区域,可以简化得到衍射光场的计算公式:

$$E(X, Y) = \frac{\text{CSO} \varphi}{i\lambda H} \exp(ikw) \iint_{\Sigma} \exp(i\phi) \exp\left[ik\left(\frac{J_3}{2H^3} - \frac{1}{H}\right)(J_1 X + J_2 Y)\right] dx' dy', \quad (13)$$

式中 w 、 J_1 、 J_2 和 J_3 仅与 X 和 Y 有关,与被积变量无关。 $\exp(ikw)$ 因子对远场衍射强度无贡献,因此在模拟衍射光强度时可忽略该因子。 J_1 、 J_2 和 J_3 的表达式为

$$\begin{cases} J_1 = \frac{R_3}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} X - \frac{R_1 R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} Y + H R_1, \\ J_2 = \sqrt{R_1^2 + R_3^2} Y + H R_2, \\ J_3 = X^2 + Y^2 + 2H \sum_{i=1}^2 (J_i - H R_i) R_i - 2H R_3 \left(\frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} X + \frac{R_2 R_3}{\sqrt{R_1^2 + R_3^2}} Y \right). \end{cases} \quad (14)$$

根据离散化数值积分的方法,可以得到远场衍射强度的分布。

4 角反射器远场衍射模式

根据以上建立的角反射器衍射区域、出射光波相位及衍射场强度计算的数学模型,可以模拟绘制出在不同光束入射条件下,角反射器远场衍射模式与角反射器二面角及面形误差的关系。

取接收屏至角反射器底面的距离 $H=500$ km,角反射器底面圆半径 $r=16$ mm,在光束垂直入射到角反射器底面时,角反射器的远场衍射模式如图 5 所示。

差的存在,角反射器衍射模式将具有一定的发散性。这种发散性与角反射器二面角误差和面形误差大小有关,二面角误差或面形误差越大,衍射模式的发散程度越高,反之亦然。同时,由于发散程度的增加,衍射模式将分化成六个独立的小衍射光斑。每个衍射光斑能量分布几乎相同,其能量中心近似分布在同一个圆周上。随着发散程度的进一步增加,每个衍射光斑的分布区域范围逐渐增加,导致衍射光斑中心能量值下降。由于地面测站点仅接收衍射强度的微小部分,因此,衍射强度的发散程度与地面测站接收能量密切相关。图 5(c)还表明,面形误差的引入会使得每个小衍射光斑的分布形状发生改变。

从图 5 中可以看出,由于二面角误差和面形误

图 6 给出了在倾斜入射条件下,角反射器三个

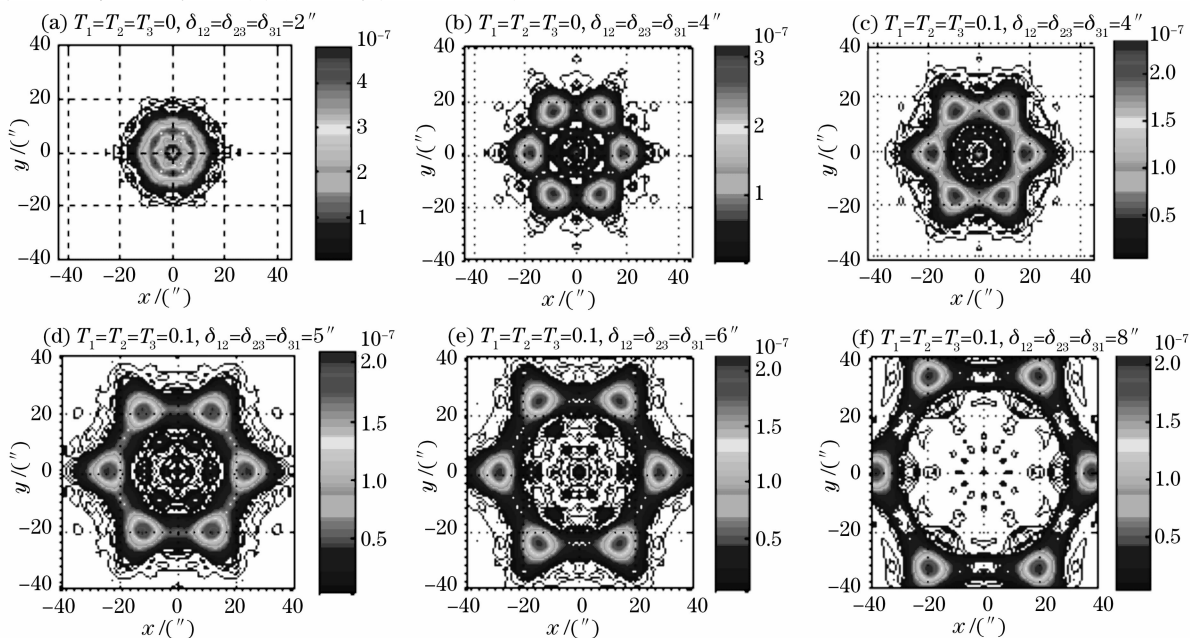


图 5 有二面角误差和面形误差的角反射器远场衍射模式

Fig. 5 Far-field diffraction pattern of retroreflector with dihedral angle error and flatness error

二面角误差和面形误差分别为 $4''$ 和 0.1 个光圈时, 角反射器的远场衍射模式。

图 6 表明, 由于光束倾斜入射到角反射器底面, 六个小衍射光斑出现了不同程度的发散, 并且各自的能量分布发生了较大的改变, 能量分布改变的程度与光束入射角有关。随着光束入射角的增加, 六个小衍射光斑中的四个能量分布迅速减小直到消

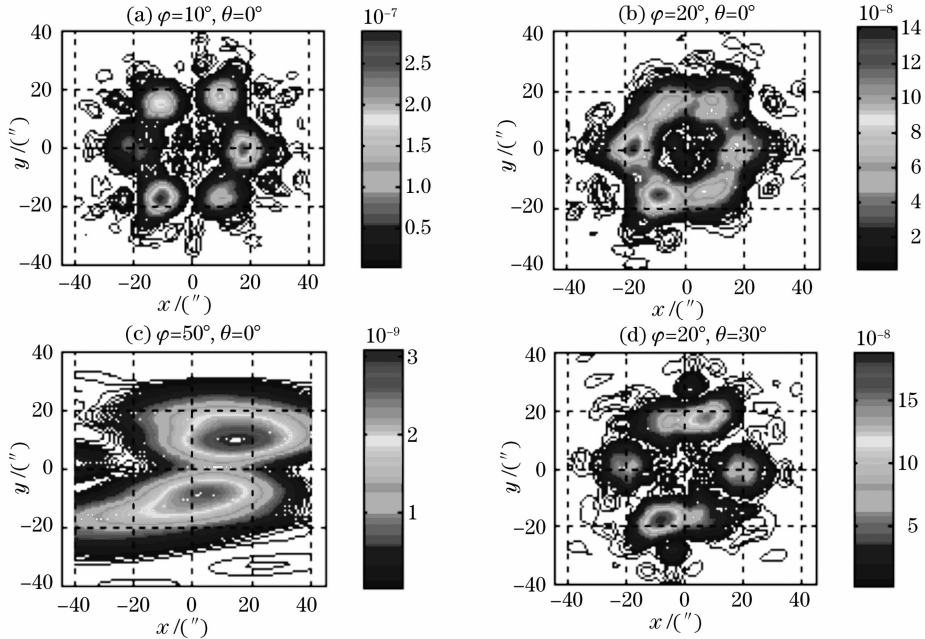


图 6 不同入射条件下角反射器的远场衍射模式

Fig. 6 Far-field diffraction pattern of retroreflector with different incidence condition

5 角反射器二面角速差补偿

角反射器安置在卫星上时, 由于地面激光发射点与卫星存在着一定的速度差, 使得反射回的光束方向相对于入射光束方向产生一个偏角^[11]:

$$\alpha = \frac{2v}{c} \sqrt{1 - (\mathbf{V} \cdot \mathbf{L})^2}, \quad (15)$$

式中 v 为卫星相对于地球运动的切向速度, c 为光速, \mathbf{V} 和 \mathbf{L} 分别表示卫星速度和光束方向的单位矢量。

偏角的引入会导致测站位置接收强度下降, 因此, 为了使地面测站接收望远系统能够在较大的观测范围接收到足够强度的激光能量, 则必须采取有效的方法来补偿速差效应。

采用光束分离法进行速差补偿, 即通过引入一个二面角误差, 使分离的激光能量正好落入接收望远镜口径内。

如图 7 建立角反射器安置坐标系: Z_R 轴指向地心, X_R 轴方向与卫星切向速度方向一致, Y_R 轴服从右手螺旋法则。考虑单个角反射器工作的情况, 则

失, 其余两个小衍射光斑能量中心逐渐减小。比较图 5(c) 和图 6(c) 可以看出, 光斑中心能量值下降了近两个数量级。这些现象的出现都是由于光束倾斜入射导致角反射器有效衍射区域分布发生变化所致。当然, 光束入射方位角同样会影响衍射光斑的能量分布, 但这种影响仅体现在衍射光斑空间位置的改变上, 而几乎不影响衍射光斑的能量值。

$O_R - X_R Y_R Z_R$ 坐标系与 $o' - x' y' z'$ 坐标系重合。

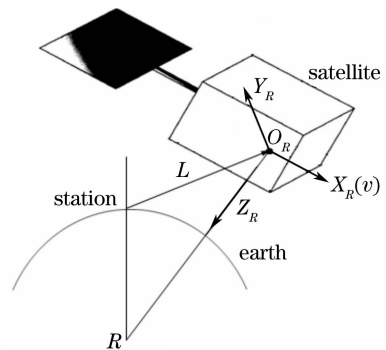


图 7 卫星角反射器坐标系

Fig. 7 Satellite retroreflector coordinate system

传统的几何光学方法补偿和天顶方向的补偿仅仅只是针对测站在较小观测范围内进行的, 这限制了角反射器的使用。合理的方法应该是: 基于不同入射条件下具有二面角误差角反射器远场衍射模式和速差补偿理论优化选取角反射器二面角补偿值。

假设角反射器面形误差限定在 0.1 个光圈范围

内,取卫星轨道高度为 500 km,地面测站仰角范围从 $15^\circ \sim 90^\circ$,则可以模拟绘制出在二面角误差在 $[0, 4'']$ 范围内,接收望远镜位置处的光强值随二面角误差变化的关系曲线,如图 8 所示。

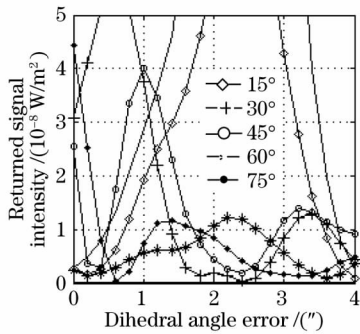


图 8 不同入射条件下接收强度与二面角误差的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between dihedral angle error and received intensity under different incident conditions

为了保证整个观测范围接收强度都满足使用要求,同时兼顾到二面角补偿值的加工和检测精度极限,二面角补偿值应该选取在不同入射条件下接收强度的“ \cap ”段,如图 8 中所示的 $0.8'' \sim 1.6''$ 。也就是说,二面角误差设计值选取为 $1.2''$,并且给定其容限误差在 $\pm 0.4''$ 。这与传统几何光学补偿值 $2.2''$ 和天顶方向补偿值 $2.5''$ 有较大的差异^[12]。当然,在单个角反射器返回强度还无法满足使用要求时,可以考虑将角反射器阵列化。角反射器阵列二面角误差补偿方法与单个角反射器误差补偿方法类似。

6 结 论

卫星角反射器的远场衍射模式直接决定了地面激光测距站回波的接收条件和接收仰角范围。首次建立了存在加工误差的角反射器倾斜入射条件下远场衍射的数学模型,采用数值模拟的方法仿真了光束入射条件、角反射器二面角误差和面形误差对远场衍射模式的影响,分析结果对卫星角反射器二面角误差和面形误差的设计具有实际的指导意义。在高精度的激光测距系统中,必须充分考虑卫星角反射器的观测条件,利用远场衍射模式分析理论,合理地设计角反射器的二面角和面形误差,保证地面测距站接收到足够的回波能量值。

参 考 文 献

- Zhang Zhiping, Cheng Zhaogu, Qin Zhaoyu *et al.*. Influence of acceleration on the error of laser dual-frequency interferometer [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 694~698
张志平,程兆谷,覃兆宇等. 加速度对激光双频干涉仪测量误差的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 694~698
- Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to reduce first harmonic nonlinearity in laser heterodyne interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1027~1030
陈洪芳,丁雪梅,钟志等. 减小外差干涉一次谐波非线性误差的方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1027~1030
- Wang Chunhai, Ji Guijun, Hu Xiaotang *et al.*. Polarization effect of cube-corner reflectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(6): 540~545
王春海,吉贵军,胡小唐等. 角锥棱镜的偏振效应[J]. *光学学报*, 1993, **13**(6): 540~545
- V. A. Dementev, P. I. Lamekin, S. M. Chernov. Fraunhofer diffraction at a nonideal corner reflector with flat faces[J]. *J. Opt. Technol.*, 2005, **72**(11): 837~842
- Xu Huaifang. Polarization characters of glass cube-corner reflector [J]. *Chin. J. Lasers*, 1986, **13**(4): 233~236
徐怀方. 玻璃角反射器棱镜的偏振特性[J]. *中国激光*, 1986, **13**(4): 233~236
- Zhou Hui, Li Song, Shi Yan *et al.*. Effect of polarization on the far-field diffraction of ideal cube corner retroreflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 418~422
周辉,李松,石岩等. 偏振态对角锥棱镜远场衍射分布的影响[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 418~422
- Nie Hui, Weng Xingtao, Li Song *et al.*. The far-field diffractive characteristics of cube-corner prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1470~1474
聂辉,翁兴涛,李松等. 角锥棱镜的远场衍射特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1470~1474
- Ye Yidong, Peng Yong, Chen Tianjiang *et al.*. Numerical simulating of cube corner retroreflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 485~490
叶一东,彭勇,陈天江等. 角锥后向反射器的数值模拟研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 485~490
- Weng Xingtao, Nie Hui, He Pingan *et al.*. Planeness issues of reflecting surfaces on a cube corner retroreflector [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1): 71~73
翁兴涛,聂辉,何平安等. 角锥棱镜的直角面面形问题[J]. *光学技术*, 2002, **28**(1): 71~73
- Liang Quanting. *Physical Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 165~166
梁铨廷. *物理光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 165~166
- R. Neubert. Preliminary design of the laser retroreflector for the CHAMP satellite [C]. *Proc. 10th Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, 1996. 216~222
- Zhou Hui, Li Song, Shi Yan *et al.*. Design of satellite laser retroreflector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(11): 25~29
周辉,李松,石岩等. 卫星角反射器的设计[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 25~29